

Рис 7. Экспериментальный стенд для испытания вихревого регулятора давления газа с распределенной подачей питающего и управляющего потоков рабочей среды а также с регулированием закрутки питающего и управляющего потоков рабочей среды

Заключение:

В результате проделанной работы рассмотрено состояние вопроса по использованию и разработке вихревых регуляторов давления газа;

Разработан алгоритм расчетно-теоретического и экспериментального исследования рабочих процессов в проточной полости вихревого регулятора давления газа;

Проведено численное моделирование рабочих процессов в проточной полости вихревого регулятора давления газа;

С применением аддитивных технологий разработан и изготовлен экспериментальный образец вихревого регулятора давления газа;

На базе разработанного экспериментального стенда проведен ряд экспериментов по работе вихревого регулятора давления газа.

Сопоставление результатов экспериментальных данных с результатами численного расчета, позволило сделать заключение об адекватности составленной математической модели;

Разработана новая конструкция вихревого регулятора давления газа с распределенной подачей управляющего потока рабочей среды, а также с регулированием закрутки питающего и управляющего потоков рабочей среды.

Библиографический список

1. Залманзон Л.А. Теория элементов пневмоники. Главная редакция физико-математической литературы изд-ва "Наука", 1969, 508с.

2. Лебедев И.В., Трескунов С.Л., Яковенко В.С. Элементы струйной автоматики. М: Машиностроение, 1973, 289-314с.

3. Бугаенко В. Ф. Пневмоавтоматика ракетно-космических систем. Будник В.С., ред. М: Машиностроение, 1979, 168с.

4. Труды МВТУ №244. Исследование и расчет струйных элементов и цепей систем автоматического регулирования. 1977.

5. Белова О.В., Стародубцев А.А., Чернышев А.В. Расчет вихревого регулятора давления газа. Инженерный журнал: наука и инновации, 2013, вып. 5. URL: <http://engbul.bmstu.ru/doc/740398.html>

6. Белова О.В., Стародубцев А.А., Чернышев А.В. Вихревой регулятора давления газа. Инженерный журнал: инженерный вестник, 2014, вып. 10. URL: <http://engjournal.ru/articles/760/760.pdf>

7. A.Yu. Uss, A.V. Chernyshev. The Development of the Vortex Gas Pressure Regulator. Procedia Engineering ,2016. v.152. pp.380-388

УДК 669.713

МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СОПЛА ПЕРЕМЕННОЙ СТЕПЕНИ РАСШИРЕНИЯ

А. А. Черепня, В. В. Бутко, М. Н. Охочинский

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» имени Д.Ф. Устинова

Аннотация

В статье рассматривается сопло с переменной степенью расширения. Проведен анализ работы существующих схем выдвигания, которые применяются до запуска двигателя. Представлена схема выдвигания конических насадок используя пневмоцилиндры, позволяющая повысить надежность системы, снизить ее массу, снизить ударные нагрузки на силовые элементы конструкции узла стыка. Подробно рассмотрен состав и принцип действия конструкции.

Приводятся расчеты на прочность и устойчивость некоторых элементов конструкции.

Ключевые слова:

БР, РДТТ, сопло, насадок, выдвигание, шарнир, нагрузки, скорость, время, прочность, устойчивость.

В ракетной технике сохраняются основные направления в области снижения пассивной массы конструкции, обеспечения наибольшей энергетики двигательных установок, а также возможности управления и отслеживания процессов, происходящих в узлах конструкции. При создании

перспективных двигателей важнейшими задачами являются повышение энергетических характеристик и надежности, увеличение ресурса, обеспечение многообразности, улучшение массовых характеристик. Одним из основных параметров, характеризующих степень совершенства ракетного двигателя, является удельный импульс, увеличение которого может быть достигнуто увеличением степени расширения сопла камеры двигателя.

В некоторых двигателях современных межконтинентальных баллистических ракет (МБР) используются сопла с дискретно изменяемой степенью расширения, т.е. с телескопическими последовательно выдвигаемыми насадками, для повышения энергетики в заданных габаритах двигателей. Особенность компоновки таких сопел явилась незаменимым техническим решением для вооружения железнодорожных ракетных комплексов и подводных лодок ВМФ, с их жесткими габаритными требованиями. Впервые схема двигателей с переменной степенью расширения была применена в 1979 году при создании ракетного комплекса РТ-23 УТТХ «Молодец» с МБР 15Ж61 подвижного железнодорожного базирования, далее такая компоновка нашла применение на высотных ступенях МБР Р-39, Р-39УТТХ «Барк», Р-30 «Булава» подводного базирования (рис. 1) и других ракетах.

У России сейчас примерно 50% ядерных ракет находятся на подводных лодках, планируется, что их доля увеличится до 75%. Такое соотношение уже сегодня есть у военных конкурентов России – США, Франции и Великобритании. Поэтому разработка, модификация и новые технические решения, в частности для уменьшения габаритов ракет подводного базирования для нужд ВМФ, остаются как никогда актуальными.

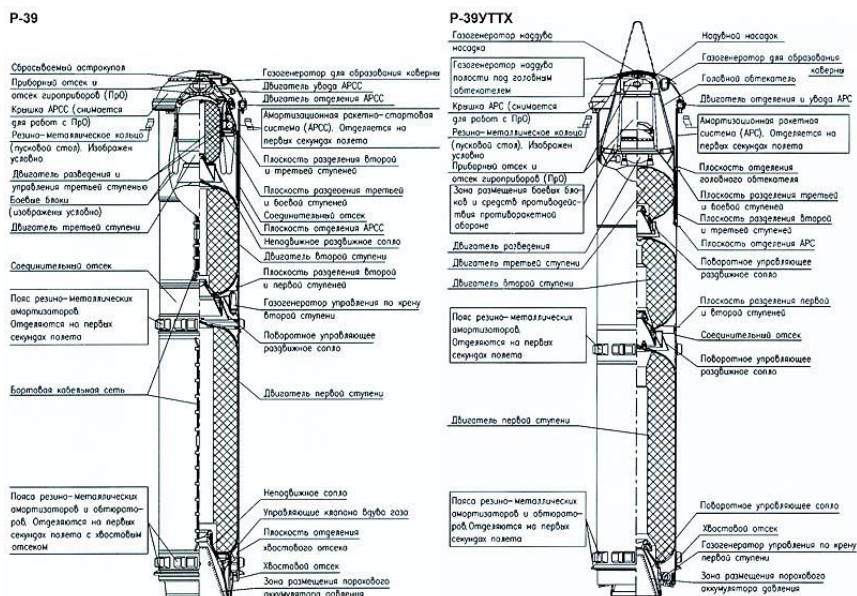


Рис. 1. МБР ПЛ Р-39 и Р-39УТТХ

Сопла изменяемой геометрии в нерабочем положении имеют компактную укладку и небольшие габаритные размеры по длине двигателя, а в рабочем – удлиняются и приобретают заданный профиль. При переводе в рабочее положение изменяется длина и диаметр, используя специально предназначенный для этих целей привод или энергию газов, истекающих из двигателя. В данной статье рассмотрен способ выдвигания насадков используя газ, подаваемый в пневмоцилиндры, удерживаемые в сложенном состоянии при помощи вакуума, что является одним из главных технических решений и особенностью данной конструкции раздвижного сопла.

Немаловажной деталью в изобретении выдвигного соплового насадка является то, из чего он изготовлен. А именно, из композиционных материалов (КМ) различных классов, прежде всего из углерод-углеродных (УУКМ) и углерод-керамических (УККМ). Применение выдвигаемого неохлаждаемого насадка из КМ позволяет обеспечить высотные условия, существенно уменьшить массу сопла и увеличить среднетракторный удельный импульс. Так же важно определить

соответствующую скорость выдвижения насадка. Она не должна быть слишком большой, так как при такой скорости могут возникнуть ударные волны, мешающие правильному функционированию двигательной установки. Скорость выдвижения не должна быть и слишком медленной, так как вылетающий из среза сопла газ начнет попадать в пространство между днищем двигателя и сопловым насадком, и снизится удельный импульс (проблема решается холодным раздвижением насадка). Определение времени выдвижения насадков является важнейшим параметром, чем быстрее произойдет выдвижение и стопорение насадков, тем меньше будет пауза при разделении ступеней.

В современных конструкциях РДТТ чаще всего применяют сопла с жесткими выдвигаемыми насадками (рис. 2), в данной статье используется именно такой тип конструкции.

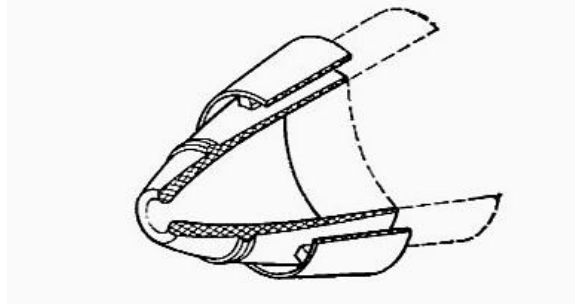


Рис. 2. Сопла с жесткими выдвигаемыми насадками

Как было сказано ранее, в качестве направляющих используются три пневмоцилиндра, расположенные на неподвижной части сопла и обеспечивающие соосное движение насадков в трех плоскостях, исключая их перекос (рис. 3). В сложенном состоянии насадки располагаются вокруг неподвижной части сопла и удерживаются в таком положении за счет создания вакуума в полости пневмоцилиндров, такое техническое решение повышает надежность и позволяет отказаться от зацепов в виде различных штоков или винтов, которые предотвращали преждевременный сход насадков из-за перегрузок на старте и дальнейшем движении на траектории.

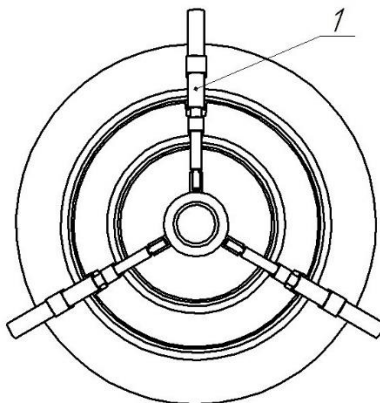


Рис. 3. Сопло с переменной степенью расширения вид сзади

Пневмоцилиндры имеют телескопическую конструкцию и в сложенном состоянии располагаются под большим углом к оси сопла (рис. 4). Концевые фланцы насадков имеют цилиндрические участки с уплотняющей прокладкой. В конечном положении прокладка поджимается и создает необходимую герметичность стыка и фиксацию. Газогенератор вырабатывает рабочий газ, поступающий в пневмоцилиндры, который раздвинет конструкцию (рис. 5), зафиксирует насадки в местах стыка и будет под давлением прижимать их к уплотнителям. В роли защелок-фиксаторов выступают упругие пластины, расположенные не по всей окружности на неподвижной части сопла или насадка, а только в трех местах, наиболее близких к пневмоцилиндрам.

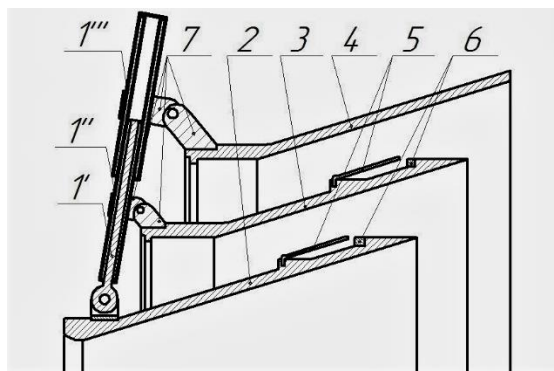


Рис. 4. Сопло с переменной степенью расширения в сложенном состоянии

Для обеспечения работоспособности всей конструкции, необходимо:
 надежное страгивание и движение насадков в натуральных условиях;
 надежная фиксация насадков в рабочем положении после выдвижения;
 реализация требуемого времени выдвижения;
 обеспечение минимальных возмущающих воздействий при выдвижении и фиксации насадков.

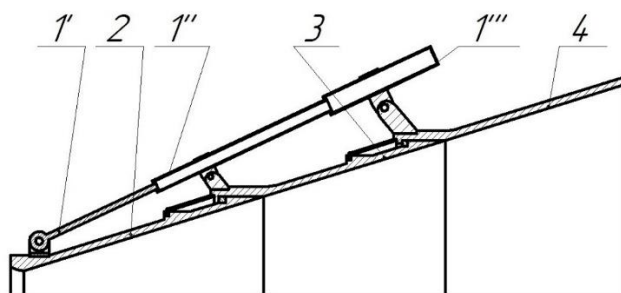


Рис. 5. Сопло с переменной степенью расширения в разложенном состоянии

Сопло переменной степени расширения состоит из неподвижного раструба 2, на котором расположены три пневмоцилиндра 1, состоящие из штока 1', первой составляющей пневмоцилиндра 1'' и второй 1'''. Насадки 3 и 4 связаны с пневмоцилиндрами шарнирно-кулисным механизмом 7. На неподвижном раструбе 2 и насадке 3 находятся фиксаторы 5 и уплотнительные кольца 6.

Для уменьшения массы конструкции раздвижения насадков был произведен расчет пневмоцилиндров на прочность и устойчивость (рис. 6). Для решения этой задачи использовалась среда ANSYS Workbench. В расчете конструкций на прочность встречаются три типа задач, различающихся формой использования условий прочности:

- проверка напряжений (проверочный расчет);
 - подбор сечений (проектный расчет);
 - определение грузоподъемности (определение допускаемой нагрузки).
- Расчеты в данной статье сведены к решению задачи подбора сечений.



Рис. 6. Механизм раздвижения

В качестве материала всех элементов используется сталь:

$E = 2,1 \cdot 10^{11}$ Па – модуль упругости;

$\mu = 0,3$ – коэффициент Пуассона;

$\rho = 7850 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ – плотность;

$[\sigma] = 160$ МПа - допускаемое напряжение (табл. 1), можно взять больше, но примем к сведению коэффициент безопасности.

Таблица 1. Допустимые напряжения для стали

Материал	Допускаемое напряжение $[\sigma]$, МПа	
	на растяжение	на сжатие
Сталь:		
углеродистая горячекатанная	115-195	
углеродистая конструкционная	110-240	
легированная	140-260	
конструкционная	90-160	
в отливках		

Расчет штока 1 был произведен:

на прочность под действием атмосферного внешнего давления 0,1 МПа;

на устойчивость под действием осевой нагрузки 3,85 кН создаваемой вдуваемым газом.

После расчета минимальный диаметр штока, обеспечивающий его прочность был равен 6,3 мм.

Таблица 2. Расчеты в ANSYS для штока 1:

	σ расчетное	σ допускаемое
Шток, нагруженный осевым сжимающим усилием:	159 МПа	160 МПа
Шток под действием внешнего атмосферного давления:	0,2 МПа	

Расчет пневмоцилиндра номер 1.

Данный расчет был произведен в соответствии с ГОСТ Р 52857.2-2007 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет цилиндрических и конических обечаек, выпуклых и плоских днищ и крышек.

Был произведен расчет:

- на прочность под действием вдуваемого внутреннего давления 7,3 МПа;
- на прочность под действием атмосферного внешнего давления 0,1 МПа;
- на устойчивость под действием осевой нагрузки 3,85 кН создаваемой газом.

Был сделан вывод, что при осевой сжимающей силе возникают самые большие напряжения, и нужно взять толщину больше $s_p = 0,64$ мм для того, чтобы цилиндр выдержал все прикладываемые к нему нагрузки. Примем $s = 0,72$ мм.

Таблица 3. Расчеты в ANSYS для пневмоцилиндра 1:

	σ расчетное	σ допускаемое
Цилиндр, нагруженный осевым сжимающим усилием:	156 МПа	160 МПа
Цилиндр под действием внутреннего избыточного давления:	72 МПа.	
Цилиндр под действием внешнего атмосферного давления:	1,0 МПа.	
Цилиндр под действием совместных осевой силы и внутреннего давления:	65 МПа.	

Расчет пневмоцилиндра номер 2.

Данный расчет будем производить в соответствии с ГОСТ Р 52857.2-2007 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет цилиндрических и конических обечаек, выпуклых и плоских днищ и крышек.

Был произведен расчет:

- на прочность под действием вдуваемого внутреннего давления 7,3 МПа;
- на прочность под действием атмосферного внешнего давления 0,1 МПа.

Расчетную толщину стенки цилиндра под действием внутреннего давления $s=0,65$ мм.

Таблица 4. Расчеты в ANSYS для пневмоцилиндра 2:

	σ расчетное	σ допускаемое
Цилиндр под действием внутреннего избыточного давления:	150 МПа	160 МПа
Цилиндр под действием внешнего атмосферного давления:	1,0 МПа	

Посредством этих вычислений, толщина стенок двух цилиндров и диаметр штока значительно уменьшились, конструкция механизма раздвижения стала легче.

Таблица 5. Результаты расчетов:

	Сокращение массы
шток 1	на 74 %;
пневмоцилиндр 1	на 76 %;
пневмоцилиндр 2	на 77 %.

Таким образом, в конечном виде конструкция раздвижного сопла с высокой степенью расширения будет выглядеть следующим образом:

- в разложенном состоянии (рис. 7);
- в собранном положении (рис. 8).



Рис. 7. Облегченная конструкция в разложенном состоянии



Рис. 8. Облегченная конструкция в собранном состоянии

Вопрос совершенствования конструкции сопла с переменной степенью расширения остается чрезвычайно актуальным, изобретение выдвигаемого соплового насадка позволяет решать ряд вопросов для нужд ракетной техники и вооружения страны. Модель находится не на конечном этапе разработки, дальнейшая проработка конструкции сопла и всего двигателя РДТТ БР, решение прочностных задач, совершенствование конструкции, новые технические решения будут продолжаться. Например, на данный момент ведутся исследования по оценке рассеивания оси сопла с учетом технологических погрешностей изготовления сопла в сборке, производится расчет на точность изготовления, учитывая вероятности погрешностей изготовления деталей сопла. Проектируется система подачи газогенераторного газа и газогенератор, который будет вырабатывать газ для пневмоцилиндров. Выбираются материалы.

В итоге была подана заявка на патент, проведенный анализ существующих аналогов по данной теме показал, что принятые в работе технические решения являются новыми.

Библиографический список

1. Охочинский М.Н., Афанасьев К.А. Системы разделения в ракетной технике. Часть 2: Системы отделения полезных нагрузок и обтекателей. Учебное пособие. — СПб., 2013. — 55 с.
2. Фахрутдинов И.Х., Котельников А.В. Конструкция и проектирование ракетных двигателей твердого топлива. Учебник для машиностроительных вузов. — М.: Машиностроение, 1987. — 328 с.
3. Фахрутдинов И.Х. Ракетные двигатели твердого топлива. Машиностроение, 1981. — 223 с.
4. Лавров Л.Н. Конструкции ракетных двигателей на твердом топливе. Машиностроение, 1993. - 216 с
5. Шишков А.А., Панин С.Д., Румянцев Б.В. Рабочие процессы в ракетных двигателях твердого топлива. Справочник. — М.: Машиностроение, 1988. — 240 с.
6. Погорелов В.И. Строительная механика тонкостенных конструкций. СПб., БГТУ— 2007. — 528 с.
7. Абугов Д.И., Бобылев В.М. Теория и расчет ракетных двигателей твердого топлива. Учебник для машиностроительных вузов — М.: Машиностроение, 1987. — 272 с.
8. Статья: «Булава» - гордость или позор? <https://inosmi.ru/military/20101101/163979339.html>